

EVALUACIÓN MULTICRITERIO/MULTIOBJETIVO APLICADA A LOS USOS Y COBERTURAS DE SUELO EN LA CUENCA DE CHILLÁN¹

Multi-criteria/Multi-objective evaluation applied to land use/cover in Chillán watershed

Cristian Henríquez Ruiz
Pontificia Universidad Católica de Chile
cghenriq@uc.cl

Jorge Qüense Abarzúa
Pontificia Universidad Católica de Chile
jquense@uc.cl

RESUMEN

La integración de las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y Evaluación Multiobjetivo (EMO) con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y programas de procesamiento de imágenes, todos ellos incluidos en el concepto amplio de Geomática, constituyen una poderosa herramienta para determinar la aptitud del territorio para ciertas actividades y usos/coberturas del suelo que requieren condiciones específicas para su expansión o consolidación en el paisaje y con ello generar lineamientos para un ordenamiento territorial efectivo. El objetivo de esta comunicación es realizar una EMC/EMO para los usos/coberturas de la cuenca del río Chillán, ubicada en la VIII Región del Biobío, con el fin de determinar los espacios más aptos para cuatro usos representativos: espacios de conservación, plantaciones forestales, usos agrícolas y áreas de expansión urbana. De un punto de vista metodológico se procesaron y analizaron imágenes satelitales Landsat, Aster y diversas coberturas complementarias, y posteriormente se ejecutó un modelo de EMC/EMO. Los resultados obtenidos permiten prever ciertos conflictos entre los suelos de alta prioridad agrícola con la presión inmobiliaria futura de la ciudad de Chillán; y en los espacios cordilleranos entre las plantaciones forestales y el bosque nativo. Estos resultados pueden ser de gran ayuda para una planificación sustentable de cuencas y planes regionales de ordenamiento territorial.

Palabras Clave: SIG, Percepción Remota, capacidad de acogida, planificación sustentable de cuencas.

ABSTRACT

The integration of Multi-Criteria Evaluation (MCE) and Multi-Objective Evaluation (MOE) techniques with the Geographic Information Systems (GIS) and images process programs, all included in the broad concept of Geomatic, are a powerful tool to determine the suitability of the territory for activities and land uses/covers that require specific conditions for their expansion or consolidation in the landscape. Thereby is possible generate guidelines for effective land use planning. The purpose of this communication is to carry out an MCE/MOE for land use/covers of Chillán watershed, located in the Bío-Bío Region, in order to determine the most suitable areas for four representative uses: spaces of conservation, forestation and afforestation, agricultural uses and urban sprawl. Methodologically were processed and analyzed satellite images as Landsat, Aster and several additional layers, and then ran a model of MCE/MOE. The results obtained allow us to forecast some conflict between agricultural and urban land use, because the realtor's pressure of Chillán occurs on high priority agricultural land; and between forest plantations and native forest in the Andean areas. These results may be helpful for a sustainable watershed planning and regional land use plans.

Keywords: GIS, remote sensing, suitable areas, sustainable watershed planning.

INTRODUCCIÓN

Las dinámicas inherentes al cambio de uso/cobertura de suelo responden al comportamiento de distintos factores biogeofísicos, económicos y humanos que pueden ser espacialmente modelados a través de las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y Evaluación Multiobjetivo (EMO) gracias a la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Muchas veces estas dinámicas entran en conflicto porque se compite por espacios que ofrecen condiciones favorables para objetivos en competencia, por ejemplo el uso urbano versus el uso agrícola los cuales son excluyentes entre sí, y en otros casos se puede presentar una interrelación más armónica cuando la satisfacción de dos o más objetivos complementarios puede ser realizada a través de una misma área; por ejemplo un bosque que es útil tanto para la vida salvaje como también puede servir como espacio de recreación (Eastman, et al, 1995).

En el caso de la cuenca del río Chillán existen condiciones naturales y humanas que posibilitan el desarrollo de actividades socio-económicas que presionan el espacio natural y rural subyacente. Un ejemplo lo representa la demanda de madera por la industria silvícola, que en

¹ Investigación financiada por el Proyecto FONDECYT de Iniciación N° 11060278 "Cambio en los usos de suelo en la cuenca del río Chillán y sus efectos en la calidad del agua y escorrentía superficial", Proyecto FONDECYT N° 1080080 "Sustentabilidad ambiental urbana, justicia socioambiental y escenarios de calidad de vida futura en la metrópolis de Santiago-Valparaíso y en la ciudad intermedia de Chillán" y Proyecto FONDECYT N° 1100657 "Evidencias del cambio climático en centros urbanos en Chile: Implicancias sobre los riesgos naturales y la capacidad adaptativa". Parte de estos resultados fueron presentados en el IV Encuentro de la Red Iberoamericana de la Evaluación y Decisión Multicriterio, Universidad de Guadalajara, México, 10-13 de noviembre de 2009.

las últimas décadas, viene reemplazando de manera continua las coberturas agro-ganaderas tradicionales y vegetación nativa de la VIII Región del Biobío por extensas plantaciones de pino *radiata* y eucaliptus. Lo mismo se puede decir de la expansión urbana del centro urbano más importante de la cuenca, la conurbación Chillán- Chillán Viejo, que debido a su gran crecimiento horizontal y disperso sobre terrenos con vocación agrícola, plantea un permanente problema de planificación territorial, donde los suelos de mayor calidad se están perdiendo de manera irreversible. Ambas situaciones demuestran la importancia de considerar los modelos de capacidad de acogida, definida como la aptitud del territorio para albergar usos de suelo de distinta naturaleza, en la planificación física de cuencas en un marco de desarrollo sostenible.

El propósito central de este trabajo es utilizar la herramienta de Evaluación Multicriterio y Evaluación Multiobjetivo como apoyo a la toma de decisiones en el ámbito territorial de una cuenca hidrográfica, resaltando el uso de los Sistemas de Información Geográfica y el procesamiento de imágenes satelitales, como una poderosa herramienta para determinar la aptitud del territorio para actividades y usos del suelo específicas.

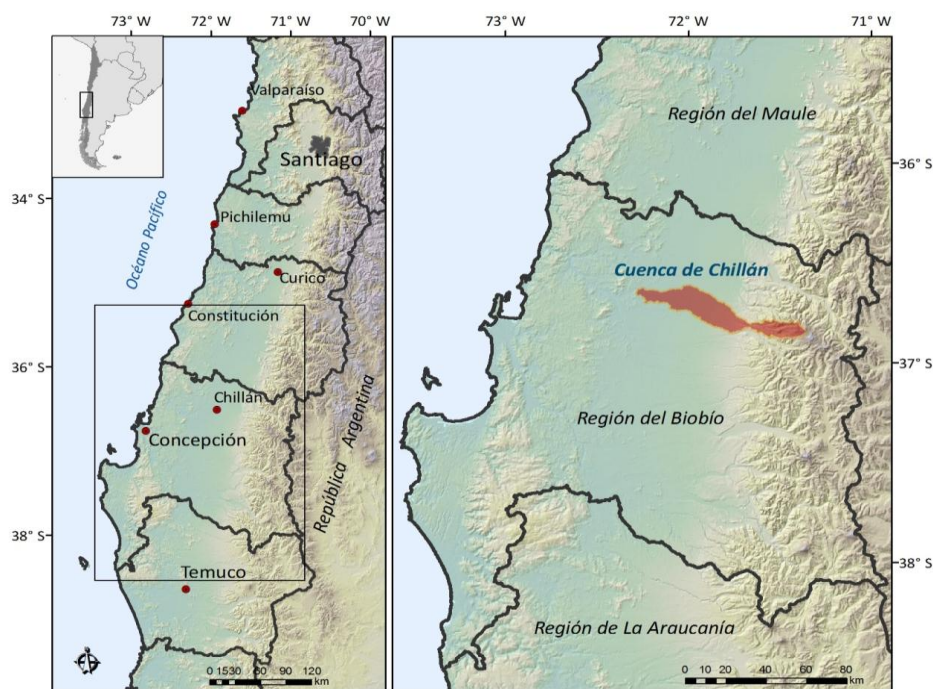
La cuenca del río Chillán se ubica entre los 71°00' y 72°30' de longitud oeste y los 36°30' y 37°00' de latitud sur, es una de las principales tributarias de la gran cuenca del río Itata que es la segunda más importante de la VIII Región del Biobío (Figura 1). La cuenca se ubica latitudinalmente en una zona de transición entre el paisaje mediterráneo típico de "Chile Central" compuesto por matorral y bosque esclerófilo y el paisaje sur de Chile que se extiende al sur del río Biobío con predominio de bosques caducifolios (Gajardo, 1994). No obstante, la parte alta de la cuenca también presenta este tipo de vegetación. En esta parte de la cuenca además de la predominancia del bosque nativo se observa en la actualidad la irrupción de plantaciones de *pinus radiata*. En el curso medio se caracteriza por cultivos agrícolas, praderas y plantaciones forestales, además se encuentra la ciudad de Chillán-Chillán Viejo. Finalmente, en el curso inferior las principales coberturas de suelo son las praderas y cultivos de riego con cubiertas aisladas de pino radiata y bosque caducifolio maulino.

Para efectos de este trabajo y en función de las dinámicas identificadas se han establecido cuatro objetivos relevantes para el desarrollo sostenible de la cuenca:

- a) Conservación natural: áreas que por sus condiciones naturales favorezcan la protección de la naturaleza y la provisión de servicios ambientales y ecológicos para la cuenca. Esto es especialmente relevante ya que la cuenca no presenta áreas silvestres protegidas, no obstante se encuentra entre dos unidades del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE): la Reserva Nacional Ñuble ubicada al sur y el Santuario y Reserva Los Huemules de Niblinto, al norte.
- b) Plantaciones forestales: delimitación de sitios que permitan la expansión de plantaciones de pinos y eucaliptos, en función de condicionantes naturales, criterios normativos y productivos. El crecimiento forestal de la región ha sido de tal envergadura que se le denomina también la capital forestal de Chile (Henríquez, 2008). En efecto, dentro de los recientes proyectos industriales ligados a la explotación forestal, destaca el Complejo Forestal Industrial Itata (CFI) de la empresa Celulosa Arauco y Constitución S.A., emplazado al poniente de la cuenca en el asentamiento de Nueva Aldea, con una inversión aproximada superior a los US\$1.400 millones (Reyes, 2003).
- c) Prioridad agrícola: zonas rurales que por las características y propiedades del suelo, inversión agrícola y propiedades físicas favorezcan el desarrollo del sector agrícola. Este objetivo se fundamenta en el objetivo-país de transformar a Chile en una potencia agroalimentaria (Rojas, 2009) y la necesidad de resguardar la escasa proporción de suelos de alta calidad agrícola existentes en el país (Santibáñez y Royo, 2002).
- d) Crecimiento urbano: oferta de terrenos potenciales para el desarrollo de proyectos urbanos de acuerdo a criterios de economías de aglomeración. Al respecto es importante mencionar que el límite urbano vigente del Plan Regulador Comunal de Chillán, que comprende al conglomerado de Chillán-Chillán Viejo, tiene una superficie

de 3.730 hectáreas la cual se aumenta con el nuevo límite de extensión urbana del Plan Regulador Intercomunal Chillán – Chillán Viejo, recientemente aprobado, a 5.500 ha, incluyendo a los centros urbanos menores de ambas comunas. No obstante es ampliamente documentado tanto en esta ciudad como en otras del país que también se urbaniza fuera de estos límites, bajo las modalidades de parcela de agrado o condominios privados.

Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca de Chillán



Fuente: Elaboración propia

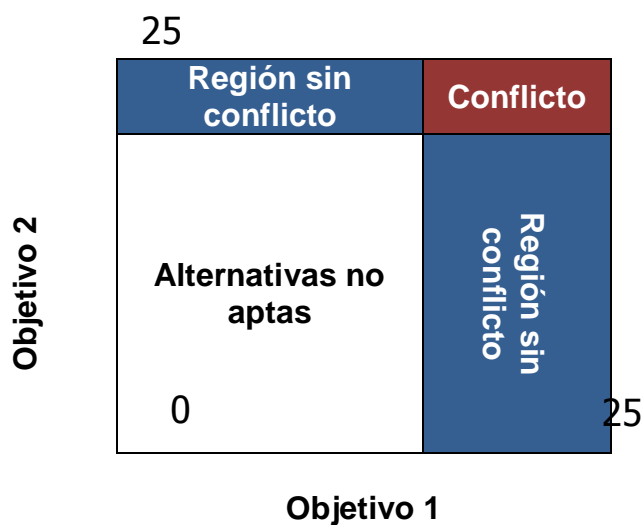
Estos cuatro objetivos planteados no solo ejemplifican la situación particular de la cuenca de Chillán sino que también ilustran las presiones y problemas que se dan sobre otros territorios en las diferentes regiones del país.

MÉTODOS

En función de las características físicas y socioeconómicas de la cuenca es posible determinar la capacidad de acogida para cada uso predominante mediante el método de EMC, entendida esta como la “sumatoria de los factores positivos, menos la sumatoria de los factores negativos a la actividad evaluada, obteniendo para cada lugar del territorio un determinado valor que refleje la capacidad” (Gómez y Barredo, 2005). En este caso como hay varias actividades que muestran una dinámica importante en la cuenca, es posible establecer varios modelos de capacidad de acogida, que al integrarlos en una EMO permitiría determinar la localización óptima de cada uso evaluado en el territorio (Gómez y Barredo, 2005). El propósito final de esto es poder determinar la mejor solución para la cuenca, o búsqueda del punto ideal, especialmente cuando hay objetivos conflictivos como sería el caso de Chillán.

Los valores de aptitud para cada objetivo se han clasificado en una escala de 0 a 255, donde 0 es nula aptitud y 255 máxima aptitud. De esta forma puede haber lugares donde la aptitud sea alta para dos objetivos a la vez, situación que se califica como conflicto, por otro lado pueden existir sitios donde el valor de aptitud para el objetivo 1 sea alto pero bajo para el objetivo 2 y viceversa, es decir una región sin conflicto, y finalmente celdas donde los valores sean bajos para ambos objetivos que constituyen alternativas no aptas (Figura 2).

Figura 2. Espacios de decisión determinado por la relación de aptitudes de dos objetivos



Fuente: Adaptado de Eastman et al. (1995).

El diseño metodológico contempla dos procedimientos generales: la determinación de la EMC para los cuatro objetivos definidos de acuerdo a su capacidad de acogida, y luego una EMO que permita la co-existencia entre los objetivos identificados para la cuenca. El método se ha realizado sobre la plataforma SIG *Idrisi Andes* (Eastman, 2006a, 2006b; Eastman, et al, 1995).

Evaluación Multicriterio

La EMC se ha realizado considerando el Método de Sumatoria Lineal Ponderada, el cual corresponde a una operación aritmética simple del tipo compensatorio aditivo (Gómez y Barredo, 2005). Este método consiste en multiplicar el valor de cada criterio o factor (coberturas georreferenciadas y normalizadas en escala de 0 a 255) por su peso (Eastman, 2006a):

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

Donde, r_i es la aptitud de la alternativa i , w_j el peso del criterio o factor j y v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio o factor j .

Para la determinación de los pesos de los factores se utilizó el Método de Jerarquía Analítica propuesto por el autor Saaty (1980). Este establece una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar (pares de factores), comparando la importancia de uno sobre cada uno de los demás, de acuerdo a una escala de ponderaciones de 1/9 a 9.

Previamente, se han propuesto una serie de variables físicas y humanas para determinar la aptitud del territorio para albergar los cuatro objetivos (Tabla 1), usando curvas (incremento monótono, decremento monótono y simétricas) y funciones de normalización apropiadas (sigmoide, forma de J y lineal), proceso denominado *Fuzzy*. Estas variables, así como la fundamentación de valores óptimos, han sido escogidas mediante la consulta de literatura especializada (Alberdi, et al, 1985; Gómez y Barredo, 2005; Henríquez, et al, 2006; Paegelow, et al, 2003; Pollmann y Hildebrand, 2005) y también de lineamientos normativos, como el subsidio forestal D.L. 701 (MINISTERIO DE AGRICULTURA, 1974, 1998), Ley 18.450 (MINISTERIO DE AGRICULTURA, 1985), el Plan Regulador Metropolitano de Santiago (MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO, 2005), entre otras fuentes.

Tabla 1: Variables y restricciones utilizadas en la EMC-EMO

Objetivo	Criterios	Fuente de información	Descripción de la función (Fuzzy)
	Restricciones		
Vegetación nativa	1. Usos no aptos	Clasificación de uso de suelo de imágenes Landsat del año 2007	Cobertura booleana: cuerpos de agua, uso urbano, cobertura nival
	2. Altitud	Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido de una imagen Aster del año 2009	Cobertura booleana: Sobre 2.600 m de altitud
	Factores		
	1. Orientaciones	Modelo Digital de Elevación (MDE)	Función simétrica: donde la mayor aptitud corresponde a las laderas sur y poniente (150°-250°)
	2. Cursos hídricos	Cartas topográficas 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM)	Función monotónicamente decreciente: mayor aptitud a 200 y 400 m de cursos.
	3. Altitudes	MDE	Función monotónicamente creciente: mayor aptitud a 800-2.600 m
	4. Pendientes	MDE	Función simétrica: mayor aptitud entre 10° y 45°
	5. Áreas protegidas	Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF)	Función monotónicamente decreciente: mayor aptitud entre 0, 500 y 3.000 m
	6. Probabilidad de cambio de uso	Cruce entre uso de suelo de imágenes Landsat del año 2007 y 1999	Estandarización de acuerdo a reclasificación de uso de suelo según probabilidades de transición de Markov 2007-1999
Objetivo	Criterios	Fuente de información	Descripción de la función (Fuzzy)
	Restricciones		
Plantación Forestal	1. Usos no aptos	Clasificación de uso de suelo de imágenes Landsat del año 2007	Cobertura booleana: cuerpos de agua, uso urbano, cobertura nival
	2. Altitud	DEM obtenido de una imagen Aster del año 2009	Cobertura booleana: sobre 2.600 m de altitud
	Factores		
	1. Clases de capacidad de uso de suelo	Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)	Estandarización de acuerdo a reclasificación de mayor a menor aptitud según clase (VI, VII, IV, III, II, I y VIII, s/i)
	2. Fragilidad del suelo	Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)	Estandarización de acuerdo a reclasificación de mayor a menor aptitud (sin erosión, ligera, moderada, severa, sin información)
	3. Altitudes	MDE	Función monotónicamente creciente: mayor aptitud a 800-2.600 m
	4. Pendientes	MDE	Función simétrica: mayor aptitud entre 10° y 45°
	5. Accesibilidad a vías	Cobertura vial del Ministerio de Obras Públicas (MOP)	Función monotónicamente decreciente: mayor aptitud entre 0, 200 y 2.000 m
	6. Tamaño del predio	Cobertura predial CIREN	Función monotónicamente creciente: mayor aptitud predios de 0 a 200 ha
	7. Probabilidad de cambio de uso	Cruce entre uso de suelo de imágenes Landsat del año 2007 y 1999	Estandarización de acuerdo a reclasificación de uso de suelo según probabilidades de transición de Markov

2007-1999		
Uso agrícola	Restricciones	Fuente de información
	1. Usos no aptos	Clasificación de uso de suelo de imágenes Landsat del año 2007
	Factores	Descripción
	1. Clases de capacidad de uso de suelo	Cobertura booleana: Cuerpos de agua, uso urbano, cobertura nival
	2. Densidad de canales de regadío	Estandarización de acuerdo a reclasificación de mayor a menor aptitud según clase (I, II, III, IV, VI, VII, VIII y s/i)
	3. Pendientes	Curva lineal: 0-100-1.000 m
	4. Pozos	Curva lineal: menor pendiente mayor aptitud (0-1,75-3,5°)
	5. Probabilidad de cambio de uso	Función monotónicamente decreciente: 0-100-1.000 m
		Estandarización de acuerdo a reclasificación de uso de suelo según probabilidades de transición de Markov 2007-1999
	Restricciones	Fuente de información
Uso urbano	1. Usos no aptos	Cobertura booleana: Cuerpos de agua, uso urbano, cobertura nival
	Factores	Descripción
	1. Accesibilidad a Chillán	Estandarización de acuerdo a análisis de distancia según fricción (COST)
	2. Accesibilidad a centros urbanos	Curva simétrica: ponderación según distribución normal (500-2.500 m)
	3. Accesibilidad a vías	Curva lineal: mayor cercanía mayor aptitud
	4. Pendientes	Curva lineal: mayor pendiente menor aptitud
	5. Riesgo por inundación	Función monotónicamente creciente: 50-100 m de un curso hídrico, menor aptitud
	6. Probabilidad de cambio de uso	Estandarización de acuerdo a reclasificación de uso de suelo según probabilidades de transición de Markov 2007-1999

Fuente: Elaboración propia.

También se han considerado restricciones (coberturas booleanas) de acuerdo a los siguientes usos/coberturas, que por su comportamiento no presentan un ritmo de cambio relevante: usos urbanos, red vial, cuerpos hídricos y cobertura nival, a los cuales se les asignó el valor 0. Asimismo, se han considerado restricciones por altitud para los objetivos de bosque nativo y plantaciones forestales.

Es importante la variable altitud, al igual que las variables de exposición de laderas y pendientes, fueron derivadas de un MDE (Modelo Digital de Elevación), construido a partir de tres escenas ASTER (*Advance Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), sensor a bordo del satélite *Terra*. Este sensor, de alta resolución espectral y espacial, consiste en tres subsistemas ópticos separados: bandas visibles e infrarrojo cercano (VNIR), bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR) y bandas de infrarrojo térmico (TIR). El subsistema VNIR realiza observaciones en posición de nadir en las porciones del verde (banda 1) y rojo (banda 2) del espectro visible y en el infrarrojo de onda corta (banda 3N), con una resolución espacial de 15 m. Además tiene otro telescopio que realiza vistas oblicuas (banda 3B) lo que permite la visión estereoscópica en el sentido de la órbita y en consecuencia la generación de un MDE. Las imágenes fueron capturadas el 30 de abril de 2009 y obtenidas desde la oficina ASTER

GDS. Posteriormente fueron corregidas con el *software* de procesamiento de imágenes PCI versión 9.1.

Una vez normalizados los factores y restricciones y asignados los pesos se utilizó el Método de Sumatoria Lineal Ponderada Ordenada (OWA en su sigla en inglés). Este se trata de un módulo incluido en *Idrisi* que permite la unión del método de EMC rígido y la lógica borrosa, para compensar entre los distintos factores (Gómez y Barredo, 2005). Para cada objetivo se han utilizados distintas combinaciones de pesos ordenados hasta alcanzar un resultado espacial óptimo.

Evaluación Multiobjetivo

Se han integrado las cuatro EMC mediante el módulo MOLA (*Multi-Objective Land Allocation*) de *Idrisi*. Para ello se requiere que los mapas estén ordenados en un *ranking* de importancia de manera descendente, donde la celda de mayor aptitud toma el valor 1. Para resolver casos de celdas que tienen igual valor de aptitud se ha usado una segunda imagen de ordenamiento (objetivo en conflicto), para que no se aplique el procedimiento de selección aleatoria por defecto. De esta forma para transformar la aptitud del mapa de conservación natural se ha usado la plantación forestal como segunda imagen de ajuste, a su vez para el uso agrícola se usó el uso urbano, y viceversa.

El proceso iterativo del proceso MOLA incluye los siguientes pasos (Eastman, 2006b): reclasificación de mapas de aptitud *rankeados* de acuerdo al área-propósito. Para ello se ha considerado una superficie de 1.000, 2.500 y 5.000 hectáreas. Luego se aplica una resolución de conflictos usando la regla de distancia mínima al punto ideal basada en los pesos de los objetivos. Se ha asignado pesos iguales (0,25). A continuación se incluye una revisión de cuán distante se encuentra del área-propósito de cada objetivo. Finalmente, se ejecuta nuevamente el proceso hasta que se alcance la solución requerida.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aptitud conservación natural

En el sector cordillerano de la cuenca de Chillán se han identificado espacios con una alta aptitud de conservación natural, los cuales se encuentran entre dos ecosistemas en peligro de conservación: el Matorral Mediterráneo de Chile Central ubicado al norte, considerado como una de las áreas ecológicamente más vulnerables del mundo con un 3% de su superficie bajo protección, y el Bosque Lluvioso Valdiviano al sur (CONAMA, 2008). Esta zona ubicada entre dos áreas protegidas, Santuario de la Naturaleza y Reserva Nacional Huemules de Niblinto y la Reserva Nacional Ñuble, en la actualidad está propuesto como un corredor biológico, entendido este como “un espacio geográfico limitado que proporciona conectividad entre paisajes, ecosistemas y hábitats, naturales o modificados y a su vez asegura el mantenimiento de la diversidad biológica, los procesos ecológicos y evolutivos”.

El Corredor Biológico Nevados de Chillán – Laguna del Laja (Figura 3) corresponde a una iniciativa interinstitucional, liderada por los organismos públicos Comité Nacional Pro Defensa de la Fauna y Flora (CODEFF), Corporación Nacional Forestal (CONAF) y Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y organizaciones no gubernamentales, los cuales pretenden conservar esta zona de alta prioridad para la conservación. El territorio del Corredor Biológico tiene una superficie aproximada de 560.000 hectáreas y comprende las comunas: San Fabián de Alico, Coihueco, Pinto, El Carmen, Yungay, Pemuco, Tucapel y Antuco. Uno de los principales símbolos de esta zona corresponde al hábitat más septentrional del huemul (*Hippocamelus bisulcus*), especie en peligro de extinción dado el alto grado de fragmentación, reducido tamaño y aislamiento de sus hábitats. Además es un lugar con alto endemismo de aves, concentración de plantas vasculares y de bosque nativo, destacando dentro de esto último la presencia de la especie de roble (*Nothofagus macrocarpa*) (Vila, et al, 2006).

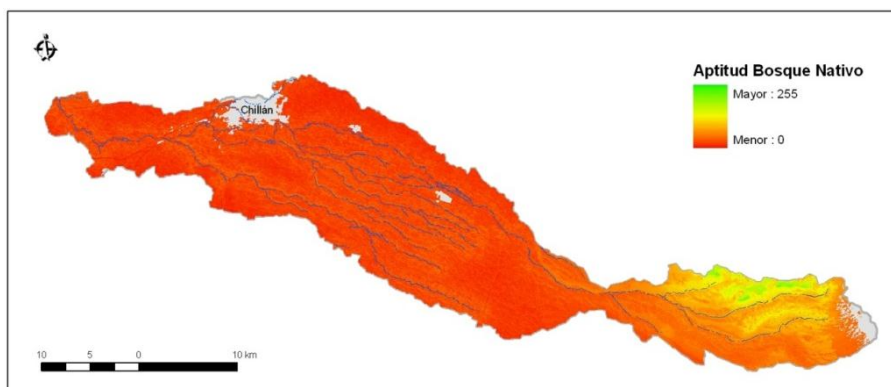
Figura 3. Corredor Biológico Nevados de Chillán – Laguna del Laja



Fuente: Cohen (2005) en CONAMA BIOBÍO *et al* (2008).

Las zonas con mayor aptitud, además de coincidir con el área del corredor propuesto, se relaciona con los criterios de distribución ecológica del bosque de roble, esto es, sectores que se extienden entre los 1.650 y 2.000 m de altitud y preferentemente en exposiciones de ladera sur (Alberdi, *et al*, 1985; Pollmann y Hildebrand, 2005). El factor con mayor peso ha sido la cercanía a las dos áreas silvestres protegidas mencionadas anteriormente (37,8%), seguido de los criterios de altitud (24%), sectores donde ya existe bosque nativo (18,5%), proximidad a drenes (10,7%), y en menor medida las exposiciones de laderas (5,7%) y pendientes (3%). Las áreas de mayor aptitud se concentran mayoritariamente al norte del río Chillán como muestra la Figura 4.

Figura 4. Mapa de aptitud de conservación natural



Fuente: Elaboración propia.

Aptitud de plantaciones forestales

Las condiciones naturales, en cuanto a características climáticas, hídricas y de suelo, hacen de la Región del Bío-Bío un espacio altamente favorable para el crecimiento de plantaciones forestales, especialmente de pino radiata. Hasta la década de los cincuenta en el siglo pasado la región se caracterizó por la producción de madera aserrada proveniente de los bosques nativos existentes en la cordillera de la Costa que al sur del río Bío-Bío se denomina cordillera de Nahuelbuta y la Precordillera Andina (Mardones, 2001). Luego del agotamiento de este recurso natural, la actividad forestal se orientó a la plantación de pino radiata que se habían comenzado a plantar a inicios del siglo veinte. No obstante se amplió el rubro productivo, allende del aserrío de pino, a la producción más especializada de pulpa de madera, papeles, cartones y chapas de madera (Henríquez, et al, 2010). Estas plantaciones se extendieron por todo el territorio incluyendo la precordillera andina y donde en el caso de la cuenca de Chillán se ha observado una dinámica forestal expansiva (Henríquez, 2008).

Este crecimiento se puede dimensionar al observar las cifras exportaciones de la región, en las cuales se aprecia que el 82,6% de las toneladas exportadas corresponde a productos forestales. Este panorama permite avizorar que el sector forestal seguirá expandiéndose en el futuro y asociado a ello se puede estimar que las presiones por seguir plantando especies exóticas continuarán en el tiempo.

Los criterios para el modelo de EMC propuesto para plantaciones forestales han sido extraídos de algunos de los requisitos para postular al subsidio estatal de acuerdo a lo estipulado en los artículos 3 y 4 del DL N° 701², cuyo texto original fue reemplazado por el Decreto Ley N° 2.565, de 1979 y luego modificado por la Ley N° 19.561 de 1998 y el Decreto Supremo N° 52, de Agricultura, de 2001 orientado a favorecer al pequeño propietario rural (Henríquez, 2008). De esta forma el criterio que se la ha asignado mayor importancia corresponde a la capacidad de uso de suelo (34,1%) y a continuación el tamaño predial (25,6%). También se ha considerado otros criterios como usos más susceptibles a cambiar a plantación forestal (15,4%), distancia a vías principales (11,5%) y altitud (6,7%). La fragilidad del suelo y pendientes sólo se les asignó sólo 4% y 2% de importancia, respectivamente.

El modelo de EMC muestra dos áreas con altos valores de aptitud para plantaciones forestales: al sur del río Chillán en el sección media y baja de la cuenca y en el sector de piedemonte, precordillera y con proyecciones hacia la Cordillera de Los Andes (Figura 5).

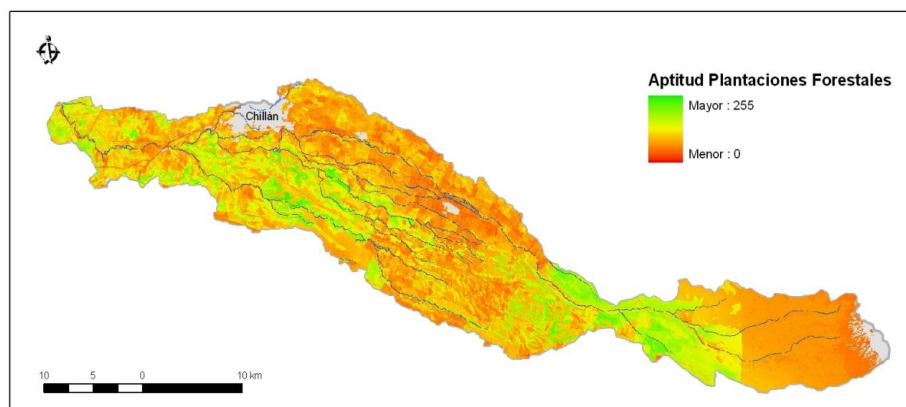
² Artículo 3°.- La calificación de terrenos de aptitud preferentemente forestal, para efectos de optar a las bonificaciones establecidas en el decreto ley, sólo procederá cuando los terrenos propuestos a calificar posean tal aptitud y correspondan a:

- a) Suelos frágiles, los cuales serán previamente certificados por organismos públicos o privados con competencia en materia de suelos y que estén acreditados en el registro que, para tales efectos, abrirá la Corporación;
- b) Suelos ñadis;
- c) Suelos ubicados en áreas en proceso de desertificación;
- d) Suelos de secano degradados y dunas; y
- e) Suelos de propiedad de pequeños propietarios forestales (Ministerio de Agricultura, 1998).

Artículo 4°.- Para efectos de optar a las bonificaciones establecidas en el decreto ley, en otro tipo de suelos que no sean de aptitud preferentemente forestal, procederá el reconocimiento de suelos forestables. En este caso, los terrenos deben corresponder a:

- a) Suelos degradados de cualquier clase para la forestación por pequeños propietarios forestales, en adelante, suelos degradados de pequeños propietarios forestales;
- b) Suelos de secano arables ubicados en áreas en proceso de desertificación;
- c) Suelos de secano arables, degradados;
- d) Suelos de clase IV de riego, que tengan la naturaleza de tales, conforme a la clasificación que utiliza el Servicio de Impuestos Internos en la tasación fiscal de los terrenos y que, además, se encuentren degradados, y
- e) Suelos para el establecimiento de cortinas cortavientos destinadas a proteger suelos degradados de cualquier clase o con serio peligro de erosión por efecto de la acción eólica (MINISTERIO DE AGRICULTURA, 1998).

Figura 5. Mapa de aptitud de plantaciones forestales



Fuente: Elaboración propia.

Aptitud agrícola

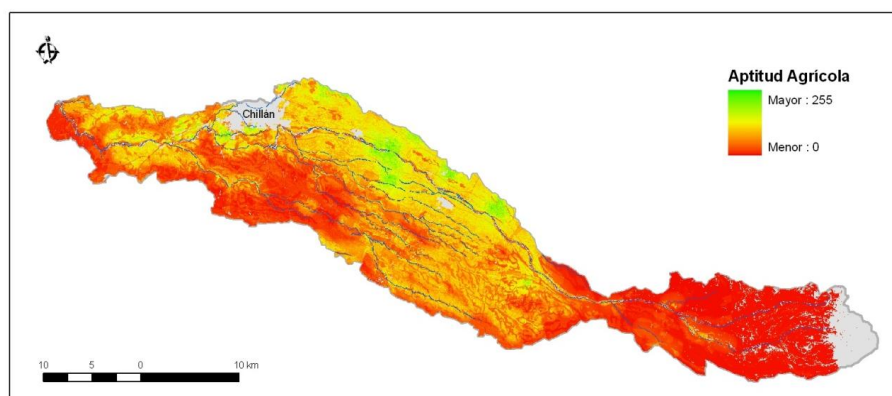
La evolución de la agricultura en la Región del Bío-Bío, y en particular en la provincia del Ñuble, está marcada por una situación favorable, no sólo por tratarse de una zona que presenta excelentes condiciones climáticas y edáficas para la producción agrícola sino además porque esta actividad presenta una histórica tradición agroproductiva. Esta situación queda plasmada en la descripción del valle de Chillán realizada por cronistas españoles del siglo XVII:

“Es el valle de Chillán fértil y apacible, donde todos los árboles y frutas de Castilla se dan en abundancia y las viñas tiene buen maduro, los campos son fértiles de hierba para todo género de ganado, que allí multiplicaron en poco tiempo con grande abundancia” (ROSALES, 1877-78, p. 210; MARDONES et al, 2001, p. 190).

Es indudable que la apertura económica chilena ha favorecido el desarrollo de los agronegocios en la medida que las exportaciones silvoagropecuarias del país superan en tres veces a las importaciones del mismo sector (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2005). Chillán se ubica en una importante área de producción agrícola y ganadera tradicional tanto a nivel nacional como regional y en forma creciente, como se expuso en el punto anterior, comienza a tener preponderancia el sector forestal. Las ventajas del sistema neoliberal y los efectos de la globalización han permitido que en las últimas décadas se desarrollen una serie de agroindustrias y agronegocios orientados al consumo interno y externo (Henríquez, et al, 2010).

Como se indicó esta situación se fundamenta en el objetivo-país de transformar a Chile en una potencia agroalimentaria (Rojas, 2009) y la necesidad de resguardar la escasa proporción de suelos de alta calidad agrícola existentes en el país (Santibáñez y Royo, 2002). Evidentemente existen terrenos con mayor o menor vocación agraria dependiendo de una serie de factores, dentro de los cuales el modelo consideró: la cercanía a canales de regadío (34,5%), las series de capacidad de uso del suelo (33,3%), proximidad a pozos (17,1%), coberturas de suelo aptas para un uso agrícola (11,7%) y las pendientes (3,1%). La distribución espacial de la capacidad acogida para el uso agrícola se distribuye en el curso medio del río Chillán, con una tendencia a concentrarse al norte de la cuenca y en menor medida al poniente de la ciudad (Figura 6).

Figura 6. Mapa de aptitud agrícola



Fuente: Elaboración propia.

Aptitud urbana

El proceso de crecimiento urbano de la ciudad Chillán, principal centro urbano de la cuenca, en las últimas décadas ha sido acelerado. Los condominios cerrados y parcelas de agrado han sido uno de los principales rasgos del crecimiento de la conurbación Chillán-Chillán Viejo, configurando un espacio periurbano fragmentado y segregado. Las tendencias muestran que el crecimiento horizontal socialmente diferenciado seguirá en aumento, relegando los edificios en altura a una segunda opción, tanto por razones naturales (inestabilidad por terremotos) como por un patrón de ocupación ya ampliamente adoptado (Henríquez, et al, 2010).

En términos poblacionales las comunas de Chillán y Chillán Viejo han pasado en el periodo 1992-2002 de 166.225 a 184.037 habitantes, alcanzando una tasa de crecimiento anual de 1,3%. En la actualidad se estima, de acuerdo a las proyecciones del INE (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICAS, 2009), que en conjunto sobrepasan los doscientos mil habitantes. Si bien la cuenca también atraviesa partes de las comunas de Coihueco, Pinto y San Ignacio, estas representan una pequeña proporción de población (Tabla 2)

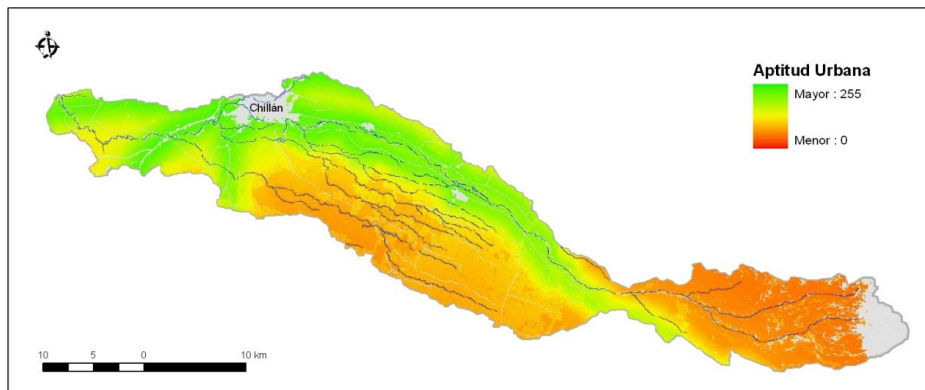
Tabla 2. Población según comunas, 1992-2010

Comuna	1992	2002	2010
Chillán	124.065	148.015	176.709
Chillán Viejo	21.694	18.827	29.961
Coihueco	5.437	7.230	24.779
Pinto	3.544	4.278	10.977
San Ignacio	2.434	4.873	15.709
Total	157.174	183.223	258.135

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Censo 1992, 2002 y proyecciones 2010 (INE).

Considerando la relevancia del núcleo urbano de Chillán y la tasa de crecimiento de su superficie urbana, que alcanza a 2,6% anual (Henríquez, et al, 2006), además de los centros urbanos menores del área de influencia, es posible inferir que el proceso urbanizador mantendrá su ritmo y nivel consumo de suelo rural adyacente. Como criterio se han considerado factores utilizados en modelos predictivos de cambio de uso de suelo que incluyen los siguientes de acuerdo a su jerarquía: accesibilidad al centro urbano principal (40,7%), accesibilidad a vías principales (25,9%), aptitud de uso/coberturas de acuerdo a la probabilidad de cambio (12,7%), cercanía a localidades urbanas (9,6%), áreas alejadas de drenes hídricos (5,5%) y sectores de bajas pendientes (5,3%). El resultado cartográfico (Figura 7) permite establecer que los principales ejes viales corresponden a las áreas de mayor aptitud urbana en función de la cercanía a la ciudad de Chillán.

Figura 7. Mapa de aptitud urbana



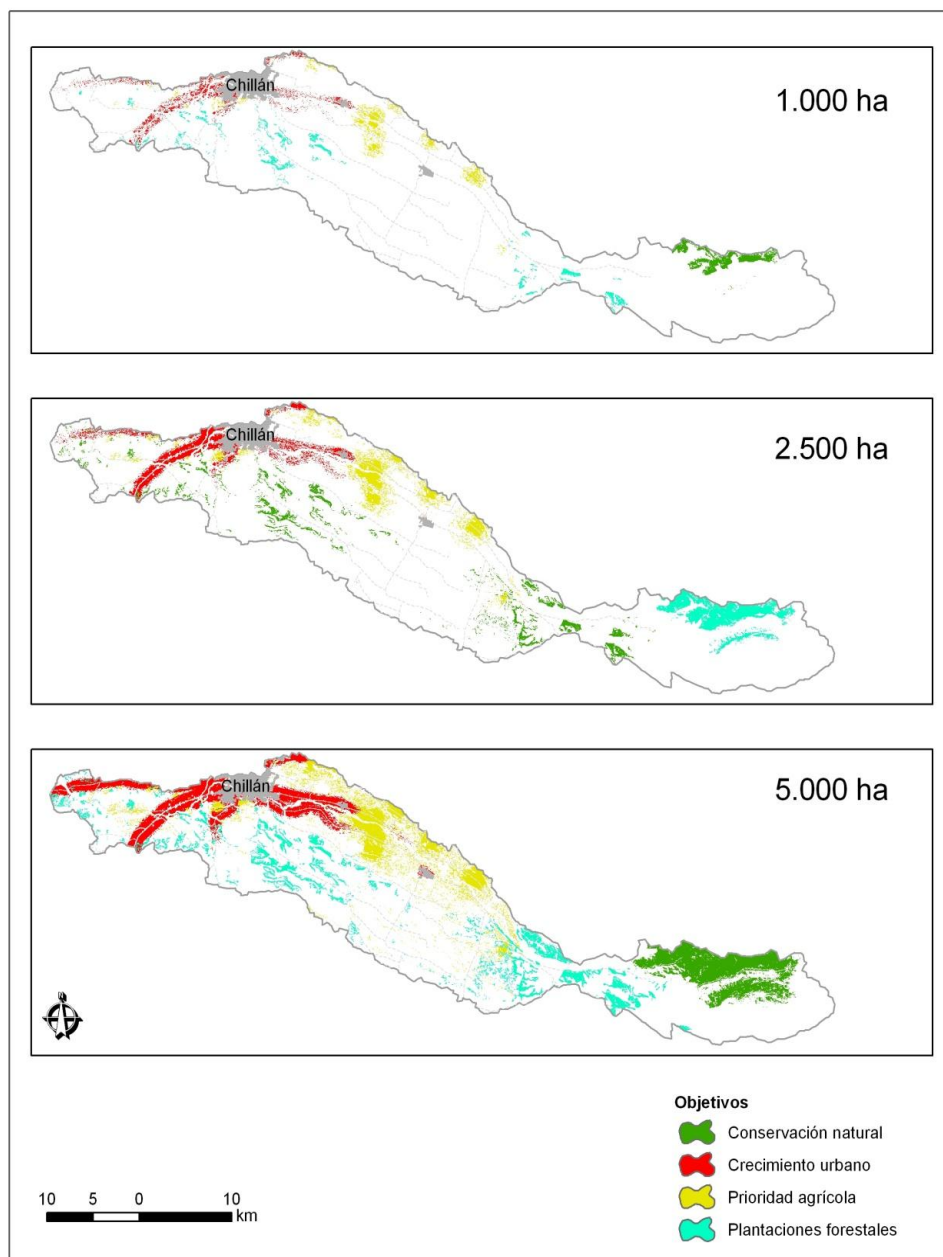
Fuente: Elaboración propia.

Evaluación Multiobjetivo

Una vez concluida la EMC de cada objetivo se debió transformar las EMC parciales a coberturas de ranking como se explicó en la metodología. En esta fase se trabajó con los objetivos en potencial conflicto para resolver el valor de celdas que tuviesen idéntica aptitud, por ejemplo, cuando existían celdas con igual valor de aptitud para el uso de plantación forestal se eligió las que tuvieran menor aptitud de conservación natural, de esta forma se resuelven espacialmente los conflictos de objetivos que teóricamente son incompatibles en el territorio. Lo mismo se aplica de manera recíproca y para los objetivos agrícola-urbanos.

Finalmente, luego de varias iteraciones se aplicó la EMO para 1.000, 2.500 y 5.000 hectáreas (Figura 8). Se observa en la EMO de 2.500 hectáreas, que los mayores conflictos se suceden en la precordillera de Los Andes, entre los usos forestales y bosque nativo, y en el acceso oriente a Chillán entre los usos urbanos y agrícolas. La EMO para 5.000 ha amplía la situación de conflicto.

Figura 8. Evaluación Multiobjetivo para la cuenca de Chillán



Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

A modo de conclusión se puede prever que se producirán problemas territoriales entre la coexistencia de usos invasivos, plantaciones forestales y superficies urbanizables, con usos pasivos, bosque nativo y usos agrícolas, respectivamente. En ambos casos, los conflictos entre áreas de conservación-forestales y entre usos agrícolas-urbanos, plantean contradicciones político-económico-territoriales de gran alcance. En primer lugar, la política de conservación puede verse afectada si es que el sector forestal sigue expandiéndose sobre zonas de alto valor natural y ya amenazadas por la acción antrópica, como lo es el sector precordillerano de la cuenca.

En este sentido el reciente caso de aprobación de una planta termoeléctrica en las cercanías de un área protegida en Punta Choros y la posterior intervención política para revertir la

decisión, demuestra las dificultades de no tener una zonificación territorial vinculante que permita proteger espacios naturales de alta significancia ecológica.

En segundo término, lo mismo puede decirse del crecimiento urbano tipo diáspora sobre terrenos agrícolas, lo cual se contradice respecto al discurso de transformar a Chile en una potencia agroalimentaria, cuando justamente al igual como sucede con el Gran Santiago la ciudad sigue “comiéndose” los campos de cultivos de alta productividad. Adicionalmente se constata la amenaza emergente del sector forestal sobre terreno de aptitud agrícola, especialmente al norte del río Chillán.

Muchos discursos y argumentaciones provienen de los círculos tecnócratas y económicos respecto a la inconveniencia de planificar sectores rurales, en donde no es posible saber a priori qué proyecto o destino es mejor para este tipo de espacios. Sin embargo, la visión territorial, ecológica y ciudadana puede y debiese plantear con igual peso las posturas y consensos que la comunidad local tiene sobre el manejo sustentable de su propio territorio. Para ello, debe comenzarse a pensar en políticas, mecanismos e instrumentos que permitiesen lograr tales objetivos. ¿Serán los Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT) tales instancias? Al parecer sí, pero se debe tener presente que mientras no se genere una forma de planificar de manera integrada, participativa y por sobre todo con disposiciones normativas sobre todo el territorio regional, será difícil lograr tales propósitos.

Finalmente, se sugiere incorporar este tipo de herramientas, como la EMC/EMO o técnicas predictivas de modelación del uso de suelo, a los procesos de planificación territorial tanto a nivel regional, comunal como local. Igual indicación se puede aplicar a la planificación de cuencas, como asistencia en la toma de decisiones.

REFERENCIAS

- ALBERDI, M. L., ROMERO, M., RÍOS, D., y WENZEL, H., (1985). Altitudinal gradients of seasonal frostresistance in *Nothofagus* communities of southern Chile. *Acta Oecol*(6): 21-30.
- COHEN, B., (2005). Mapa Corredor Biológico Nevados de Chillán-Laguna del Laja. California, The Nature Conservancy (TNC).
- CONAMA, (2008). Corredor Biológico Nevados de Chillán-Laguna del Laja, Región del BIOBÍO: Para la Conservación de la Biodiversidad y el Huemul en los Andes de Chile Central. Comisión Nacional del Medio Ambiente [en línea]. <www.corredorbiologico.cl> [consulta: 27 septiembre 2009].
- CONAM BIOBÍO, CODEFF, CONAF y TNC, (2008). Corredor Biológico Nevados de Chillán-Laguna del Laja, Región del BIOBÍO: Para la Conservación de la Biodiversidad y el Huemul en los Andes de Chile Central.
- EASTMAN, J. R., (2006) A. IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, MA: Clark Labs, Clark University. 327p.
- EASTMAN, J. R., (2006)b. IDRISI Andes. Tutorial. Worcester, MA: Clark Labs, Clark University. 328p.
- EASTMAN, J. R., JIN, W., KYEM, P., y TOLEDANO, J., 1995. Raster procedures for Multi-Criteria/Multi Objective Decision. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(5): 539-547.
- GAJARDO, R., (1994). La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Santiago, Chile: Universitaria.
- GÓMEZ, M., y BARREDO, J., (2005). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio (2da Edición Actualizada ed.). Madrid: Editorial Ra-Ma. 279p.
- HENRÍQUEZ, C. (2008). Apertura neoliberal y expansión forestal: algunos factores para su modelación en la cuenca de Chillán. Paper presented at the Actas del X Coloquio Internacional de Geocrítica, Diez años de cambios en el Mundo, en la Geografía y en las Ciencias Sociales, 1999-2008.
- HENRÍQUEZ, C., ARENAS, F., y HENRÍQUEZ, M., (2010). Transformaciones urbanas en la ciudad de Chillán: Lo local y lo tradicional frente a la influencia externa. En: RECIME (Eds.), *Ciudades Medias*. Sao Paulo: (En prensa).
- HENRÍQUEZ, C., AZÓCAR, G., y ROMERO, H., (2006). Monitoring and modeling urban growth in a developing country: the case of mid-cities of Chillan and Los Angeles, Chile. *Habitat International*, 30: 945-964.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, (2009). Proyecciones de población [en línea] tiago,<www.inec.cl> [consulta: 18 de mayo 2009].
- MARDONES, M. (Ed.), (2001). Geografía VIII Región del Biobío (Vol. 30). Santiago: Instituto Geográfico Militar, IGM.

- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1974). Decreto Ley N° 701 de 1974 de Fomento Forestal, Santiago.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1985). Ley N° 18.450 de Fomento a la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1998). Reglamento General del Decreto Ley N° 701 de 1974, sobre Fomento Forestal y Decreto Supremo N° 193, de 1998.
- MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO (2005). Ordenanza Plan Regulador Metropolitano de Santiago. Texto actualizado y compaginado.
- OFICINA DE ESTUDIOS Y POLÍTICAS AGRARIAS, (2005). Panorama de la Agricultura Chilena [en línea], Santiago, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Ministerio de Agricultura. <<http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/Panorama2005-2daEdicion.pdf>> [consulta: 18 de octubre 2009].
- PAEGELOW, M., CAMACHO, M. T., y TORIBIO, J. M., (2003). Cadenas de Markov, Evaluación Multicriterio y Evaluación Multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*(3): 22-44.
- POLLMANN, W., y HILDEBRAND, R., (2005). Structure and the Composition of Species in Timberline Ecotones of the Southern Andes. En: G. Broll y B. Keplin (Eds.), *Mountain Ecosystems: Studies in Treeline Ecology* (pp. 117-151). Berlin: Springer.
- REYES, M. A., (2003). ¿Industrialización versus pobreza rural? El caso del proyecto Celulosa en el valle del Río Itata. *Tiempo y Espacio*, 13: 35-47.
- ROJAS, H., (2009). Potencia Agroalimentaria y Forestal con adjetivos [en línea] Santiago, Ministerio de Agricultura, Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP). <<http://www.indap.gob.cl/content/view/1556/488/>> [consulta: 7 julio 2009].
- SAATY, T., (1980). *The analytical hierarchy process*. New York: Mc Graw Hill.
- SANTIBÁÑEZ, F., y ROYO, A., (2002). Suelos. En: U. d. C. Centro de Análisis de Políticas Públicas (Eds.), *Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile 2002*. (pp. 203-244). Santiago: LOM Ediciones.
- VILA, A. R., LÓPEZ, R., PASTORE, H., FAÚNDEZ, R. y SERRET, A., (2006). Current distribution and conservation of the huemul (*Hippocamelus bisulcus*) in Argentina and Chile. *Mastozoología neotropical*, 13: 263-269.